آموزش ریدبرگ

حاجیییی ماتریس چگالی داره این نردبونمون پشمام....
برو نردبون حیاطتتون ببین .. اون ماتریس چگالی داره
عجب زندگی سختی

فهرست مطالب

۰-۱ توصیف ماتریس چگالی برای سامانه‌ی Ladder EIT ۲
۰-۱-۱ تعریف دیتونینگ‌ها ۳
۰-۱-۲ هامیلتونی سامانه در چارچوب چرخان ۳
۰-۱-۳ ماتریس چگالی سامانه ۳
۰-۱-۴ معادله‌ی کلی حرکت ماتریس چگالی ۴
۰-۱-۵ معادلات جمعیت‌ها ۴
۰-۱-۶ معادلات همدوسی‌ها ۴
۰-۱-۷ تقریب Weak Probe ۵
۰-۱-۸ حل حالت پایا ۵
۰-۱-۹ پذیرفتاری نوری میدان probe ۶
۰-۱-۱۰ شرط ایده‌آل برای ظهور EIT ۶
۰-۱-۱۱ حالت تاریک در سامانه‌ی Ladder EIT ۷
۰-۱-۱۲ نتیجه‌ی فیزیکی نهایی ۷

شکل ۰-۱: اینم مراحل تخمی تخیلیش که باید بلد باشیم بفمیییم چی چی میگه تا بتونیم در این دنیا مادی زندگی کنیم و بعدش بریم دنیا بعدی اونجام احتمالا ماتریس داره ... که یک ایرانی بدبخت باید بره یاد بگیره بازم چون ایرانی نافش با ماتریس چگالی بریدن

همیلتونییی یعنی انرژی و نحوه کوپل شدن حالت ها.

Step ۲ -هامیلتونی در چارچوب چرخان

در سامانه‌ی ladder EIT سه حالت اتمی به‌صورت $|۱\rangle$، $|۲\rangle$، و $|۳\rangle$ در نظر گرفته می‌شوند. حالت $|۱\rangle$ حالت پایه، حالت $|۲\rangle$ حالت میانی برانگیخته، و حالت $|۳\rangle$ حالت بالایی، مثلاً حالت Rydberg است. میدان probe گذار $|۱\rangle \leftrightarrow |۲\rangle$ را کوپل می‌کند و میدان control گذار $|۲\rangle \leftrightarrow |۳\rangle$ را به هم وصل می‌کند.

در تقریب rotating wave approximation و در چارچوب چرخان، هامیلتونی مؤثر سامانه را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\hat{H} = -\hbar\Delta_p |۲\rangle\langle۲| - \hbar\delta |۳\rangle\langle۳| - \frac{\hbar}{۲}\left[\Omega_p |۲\rangle\langle۱| + \Omega_c |۳\rangle\langle۲| + \text{h.c.}\right]. \tag{۱-۰}$$

در این رابطه، Δ_p دیتونینگ میدان probe از گذار $|۱\rangle \leftrightarrow |۲\rangle$ است:

$$\Delta_p = \omega_p - \omega_{۲۱}. \tag{۲-۰}$$

همچنین δ دیتونینگ دو-فوتونی است که برای سامانه‌ی ladder معمولاً به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta = \Delta_p + \Delta_c, \tag{۳-۰}$$

که در آن Δ_c دیتونینگ میدان control از گذار $|۲\rangle \leftrightarrow |۳\rangle$ است:

$$\Delta_c = \omega_c - \omega_{۳۲}. \tag{۴-۰}$$

جمله‌ی اول هامیلتونی،

$$-\hbar\Delta_p |۲\rangle\langle۲|, \tag{۵-۰}$$

انرژی مؤثر حالت میانی $|۲\rangle$ را در چارچوب چرخان نشان می‌دهد. اگر $\Delta_p = ۰$ باشد، میدان probe دقیقاً روی رزونانس گذار $|۱\rangle \rightarrow |۲\rangle$ قرار دارد. اما اگر $\Delta_p \neq ۰$ باشد، لیزر probe از رزونانس فاصله دارد و حالت $|۲\rangle$ در چارچوب چرخان به‌اندازه‌ی این دیتونینگ جابه‌جا دیده می‌شود.

جمله‌ی دوم،

$$-\hbar\delta\,|۳\rangle\langle۳|\,, \tag{۶-۰}$$

انرژی مؤثر حالت بالایی $|۳\rangle$ را نشان می‌دهد. چون حالت $|۳\rangle$ از طریق جذب دو فوتون، یعنی یک فوتون probe و یک فوتون control، قابل دسترسی است، کمیت مهم برای این حالت دیتونینگ دو-فوتونی δ است. وقتی $\delta = ۰$ باشد، انرژی کل دو فوتون دقیقاً با اختلاف انرژی بین $|۱\rangle$ و $|۳\rangle$ سازگار است. این همان شرط اصلی برای تشکیل dark state و ظهور EIT است.
جمله‌های داخل کروشه، کوپلینگ‌های نوری را نشان می‌دهند:

$$\Omega_p\,|۲\rangle\langle۱| \tag{۷-۰}$$

بیان می‌کند که میدان probe با قدرت Ω_p، حالت $|۱\rangle$ را به حالت $|۲\rangle$ کوپل می‌کند. در اینجا Ω_p فرکانس رابی میدان probe است و شدت کوپلینگ نوری این گذار را تعیین می‌کند.
به‌طور مشابه،

$$\Omega_c\,|۳\rangle\langle۲| \tag{۸-۰}$$

نشان می‌دهد که میدان control با فرکانس رابی Ω_c، حالت $|۲\rangle$ را به حالت $|۳\rangle$ کوپل می‌کند.
عبارت h.c. به معنی Hermitian conjugate است. این عبارت جمله‌های برگشتی را به هامیلتونی اضافه می‌کند:

$$\text{h.c.} = \Omega_p^*\,|۱\rangle\langle۲| + \Omega_c^*\,|۲\rangle\langle۳|\,. \tag{۹-۰}$$

بنابراین اگر قسمت کوپلینگ را کامل باز کنیم، داریم:

$$\Omega_p\,|۲\rangle\langle۱| + \Omega_c\,|۳\rangle\langle۲| + \Omega_p^*\,|۱\rangle\langle۲| + \Omega_c^*\,|۲\rangle\langle۳|\,. \tag{۱۰-۰}$$

وجود این جمله‌های مزدوج هرمیتی لازم است، چون کوپلینگ‌های فیزیکی دوطرفه‌اند:

$$|۱\rangle \leftrightarrow |۲\rangle\,, \qquad |۲\rangle \leftrightarrow |۳\rangle\,. \tag{۱۱-۰}$$

ضریب $\hbar/۲$ در جمله‌ی کوپلینگ از تعریف استاندارد فرکانس رابی می‌آید. در برهمکنش دوقطبی اتم با میدان الکتریکی، انرژی برهمکنش از نوع $-\mathbf{d}\cdot\mathbf{E}$ است و پس از اعمال تقریب موج چرخان، کوپلینگ مؤثر معمولاً با ضریب $\hbar\Omega/۲$ ظاهر می‌شود.
توضیح فیزیکی: این هامیلتونی نشان می‌دهد که در چارچوب چرخان، حالت میانی $|۲\rangle$ به‌اندازه‌ی دیتونینگ probe و حالت بالایی $|۳\rangle$ به‌اندازه‌ی دیتونینگ دو-فوتونی از رزونانس فاصله دارند. از طرف دیگر، میدان probe حالت $|۱\rangle$ را به $|۲\rangle$ و میدان control حالت $|۲\rangle$ را به $|۳\rangle$ وصل می‌کند. وقتی دیتونینگ دو-فوتونی نزدیک صفر باشد، این کوپلینگ‌ها می‌توانند یک حالت تاریک بسازند که در آن حالت میانی اتلافی $|۲\rangle$ اشغال نمی‌شود؛ بنابراین جذب probe سرکوب شده و پنجره‌ی EIT ظاهر می‌شود.

۱۰-۱ توصیف ماتریس چگالی برای سامانه‌ی Ladder EIT

در سامانه‌ی سه‌ترازی از نوع ladder، سه حالت اتمی به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$|۱\rangle = \text{حالت پایه}, \qquad |۲\rangle = \text{حالت میانی برانگیخته}, \qquad |۳\rangle = \text{حالت ریدبرگ}. \tag{۱۲-۰}$$

گذار اول، یعنی $|۱\rangle \leftrightarrow |۲\rangle$، توسط میدان probe با فرکانس رابی Ω_p کوپل می‌شود. گذار دوم، یعنی $|۲\rangle \leftrightarrow |۳\rangle$، توسط میدان control با فرکانس رابی Ω_c کوپل می‌شود. بنابراین ساختار کلی سامانه به‌صورت زیر است:

$$|۱\rangle \xleftrightarrow[\Omega_p]{\text{probe}} |۲\rangle \xleftrightarrow[\Omega_c]{\text{control}} |۳\rangle\,. \tag{۱۳-۰}$$

توضیح فیزیکی: میدان probe اتم را از حالت پایه به حالت میانی می‌برد و میدان control حالت میانی را به حالت ریدبرگ وصل می‌کند. ظهور EIT زمانی اتفاق می‌افتد که مسیر دو-فوتونی از $|۱\rangle$ به $|۳\rangle$ به‌صورت همدوس برقرار شود.

۰-۱-۱ تعریف دیتونینگ‌ها

دیتونینگ میدان probe از گذار $|۱\rangle \leftrightarrow |۲\rangle$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta_p = \omega_p - \omega_{۲۱}. \tag{۰-۱۴}$$

همچنین دیتونینگ میدان control از گذار $|۲\rangle \leftrightarrow |۳\rangle$ برابر است با:

$$\Delta_c = \omega_c - \omega_{۳۲}. \tag{۰-۱۵}$$

برای سامانه‌ی ladder، دیتونینگ دو-فوتونی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\delta = \Delta_p + \Delta_c. \tag{۰-۱۶}$$

توضیح فیزیکی: شرط اصلی برای تشکیل حالت تاریک این است که دیتونینگ دو-فوتونی تقریباً صفر باشد. یعنی مجموع انرژی دو فوتون probe و control باید با اختلاف انرژی بین حالت پایه و حالت ریدبرگ سازگار باشد.

۰-۱-۲ هامیلتونی سامانه در چارچوب چرخان

در تقریب موج چرخان یا Rotating Wave Approximation، هامیلتونی سامانه را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\hat{H} = -\hbar\Delta_p |۲\rangle\langle۲| - \hbar\delta |۳\rangle\langle۳| - \frac{\hbar}{۲}\left[\Omega_p |۲\rangle\langle۱| + \Omega_c |۳\rangle\langle۲| + \text{h.c.}\right]. \tag{۰-۱۷}$$

توضیح فیزیکی: دو جمله‌ی اول اثر فاصله‌ی فرکانسی لیزرها از رزونانس را نشان می‌دهند و جمله‌های شامل Ω_p و Ω_c نشان‌دهنده‌ی کوپل‌شدن حالت‌های اتمی توسط میدان‌های نوری هستند.

۰-۱-۳ ماتریس چگالی سامانه

برای یک سامانه‌ی سه‌سطحی، ماتریس چگالی به‌شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\hat{\rho} = \begin{pmatrix} \rho_{۱۱} & \rho_{۱۲} & \rho_{۱۳} \\ \rho_{۲۱} & \rho_{۲۲} & \rho_{۲۳} \\ \rho_{۳۱} & \rho_{۳۲} & \rho_{۳۳} \end{pmatrix}. \tag{۰-۱۸}$$

در این ماتریس، عناصر قطری جمعیت حالت‌ها را نشان می‌دهند:

$$\rho_{۱۱}, \quad \rho_{۲۲}, \quad \rho_{۳۳}. \tag{۰-۱۹}$$

عناصر غیرقطری نیز همدوسی‌های کوانتومی میان حالت‌ها هستند:

$$\rho_{۲۱}, \quad \rho_{۳۲}, \quad \rho_{۳۱}. \tag{۰-۲۰}$$

در سامانه‌ی Ladder EIT، مهم‌ترین عناصر عبارت‌اند از:

$\rho_{۲۱}$: همدوسی مربوط به پاسخ میدان probe, (۰-۲۱)

$\rho_{۳۱}$: همدوسی بین حالت پایه و حالت ریدبرگ, (۰-۲۲)

$\rho_{۳۲}$: همدوسی مربوط به گذار میدان control. (۰-۲۳)

توضیح فیزیکی: عنصر $\rho_{۲۱}$ تعیین می‌کند که میدان probe چقدر جذب شود یا عبور کند. عنصر $\rho_{۳۱}$ نیز همان همدوسی کلیدی بین حالت پایه و حالت ریدبرگ است که باعث تشکیل حالت تاریک می‌شود.

شکل ۰-۲: خر تو خر شددد که حالا چه گلی بگیریم سرمونننننننننن چرا ااا
هرچی میره جلوتر پیچیده تر میشه

۰-۱-۴ معادله‌ی کلی حرکت ماتریس چگالی

تحول زمانی ماتریس چگالی با معادله‌ی equation master نوشته می‌شود:

$$\frac{d\hat{\rho}}{dt} = -\frac{i}{\hbar}\left[\hat{H}, \hat{\rho}\right] + \mathcal{L}[\hat{\rho}]. \tag{۰-۲۴}$$

در این معادله، جمله‌ی اول تحول همدوس ناشی از هامیلتونی را توصیف می‌کند و جمله‌ی $\mathcal{L}[\hat{\rho}]$ اثرات واپاشی و ناهمدوسی را در نظر می‌گیرد.
توضیح فیزیکی: اتم فقط تحت اثر لیزرها تکامل پیدا نمی‌کند؛ بلکه حالت‌های برانگیخته واپاشی می‌کنند و همدوسی‌های کوانتومی نیز به‌دلیل برهم‌کنش با محیط از بین می‌روند.

۰-۱-۵ معادلات جمعیت‌ها

اگر نرخ واپاشی حالت میانی $|۲\rangle$ برابر $\Gamma_۲$ و نرخ واپاشی حالت ریدبرگ $|۳\rangle$ برابر $\Gamma_۳$ باشد، معادلات جمعیت‌ها به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\dot{\rho}_{۱۱} = \Gamma_۲\rho_{۲۲} + \frac{i}{۲}\left(\Omega_p^*\rho_{۲۱} - \Omega_p\rho_{۱۲}\right), \tag{۰-۲۵}$$

$$\dot{\rho}_{۲۲} = -\Gamma_۲\rho_{۲۲} + \Gamma_۳\rho_{۳۳} + \frac{i}{۲}\left(\Omega_p\rho_{۱۲} - \Omega_p^*\rho_{۲۱}\right) + \frac{i}{۲}\left(\Omega_c^*\rho_{۳۲} - \Omega_c\rho_{۲۳}\right), \tag{۰-۲۶}$$

$$\dot{\rho}_{۳۳} = -\Gamma_۳\rho_{۳۳} + \frac{i}{۲}\left(\Omega_c\rho_{۲۳} - \Omega_c^*\rho_{۳۲}\right). \tag{۰-۲۷}$$

توضیح فیزیکی: جمعیت هر سطح هم به‌وسیله‌ی کوپلینگ نوری جابه‌جا می‌شود و هم به‌وسیله‌ی واپاشی از بین می‌رود یا به سطح‌های پایین‌تر منتقل می‌شود.

۰-۱-۶ معادلات همدوسی‌ها

برای همدوسی مربوط به میدان probe داریم:

$$\dot{\rho}_{۲۱} = -\left(\gamma_{۲۱} - i\Delta_p\right)\rho_{۲۱} + \frac{i\Omega_p}{۲}\left(\rho_{۱۱} - \rho_{۲۲}\right) + \frac{i\Omega_c^*}{۲}\rho_{۳۱}. \tag{۰-۲۸}$$

توضیح فیزیکی: این معادله نشان می‌دهد که پاسخ probe فقط به اختلاف جمعیت بین $|۱\rangle$ و $|۲\rangle$ وابسته نیست، بلکه میدان control از طریق $\rho_{۳۱}$ می‌تواند جذب probe را سرکوب کند.

برای همدوسی بین حالت پایه و حالت ریدبرگ داریم:

$$\dot{\rho}_{۳۱} = -\left(\gamma_{۳۱} - i\delta\right)\rho_{۳۱} + \frac{i\Omega_c}{۲}\rho_{۲۱} - \frac{i\Omega_p}{۲}\rho_{۳۲}. \qquad (۲۹\text{-}۰)$$

توضیح فیزیکی: عنصر $\rho_{۳۱}$ همدوسی اصلی حالت تاریک در Ladder EIT است. اگر این همدوسی حفظ شود، اتم می‌تواند بدون اشغال قابل‌توجه حالت میانی $|۲\rangle$، در یک برهم‌نهی بین $|۱\rangle$ و $|۳\rangle$ قرار گیرد.

برای همدوسی مربوط به میدان control نیز داریم:

$$\dot{\rho}_{۳۲} = -\left(\gamma_{۳۲} - i\Delta_c\right)\rho_{۳۲} + \frac{i\Omega_c}{۲}\left(\rho_{۲۲} - \rho_{۳۳}\right) - \frac{i\Omega_p^*}{۲}\rho_{۳۱}. \qquad (۳۰\text{-}۰)$$

توضیح فیزیکی: این همدوسی نشان می‌دهد که میدان control چگونه حالت میانی را به حالت ریدبرگ متصل می‌کند.

۷-۱-۰ تقریب Weak Probe

در بسیاری از آزمایش‌های EIT، میدان probe بسیار ضعیف‌تر از میدان control است:

$$\Omega_p \ll \Omega_c. \qquad (۳۱\text{-}۰)$$

در این رژیم، میدان probe فقط نقش اندازه‌گیر دارد و جمعیت اتم‌ها را به‌طور قابل‌توجهی تغییر نمی‌دهد. بنابراین در مرتبه‌ی صفر می‌توان نوشت:

$$\rho_{۱۱} \simeq ۱, \qquad \rho_{۲۲} \simeq ۰, \qquad \rho_{۳۳} \simeq ۰. \qquad (۳۲\text{-}۰)$$

همچنین در مرتبه‌ی اول نسبت به Ω_p، اثر $\rho_{۳۲}$ معمولاً قابل صرف‌نظر کردن است:

$$\rho_{۳۲} \simeq ۰. \qquad (۳۳\text{-}۰)$$

توضیح فیزیکی: در رژیم weak probe تقریباً همه‌ی اتم‌ها در حالت پایه باقی می‌مانند و میدان probe فقط پاسخ نوری محیط را بررسی می‌کند.

۸-۱-۰ حل حالت پایا

در حالت پایا داریم:

$$\dot{\rho}_{۲۱} = ۰, \qquad \dot{\rho}_{۳۱} = ۰. \qquad (۳۴\text{-}۰)$$

با استفاده از تقریب $\rho_{۱۱} \simeq ۱$، $\rho_{۲۲} \simeq ۰$، و $\rho_{۳۲} \simeq ۰$، معادلات (۲۸-۰) و (۲۹-۰) به‌صورت زیر ساده می‌شوند:

$$۰ = -\left(\gamma_{۲۱} - i\Delta_p\right)\rho_{۲۱} + \frac{i\Omega_p}{۲} + \frac{i\Omega_c^*}{۲}\rho_{۳۱}, \qquad (۳۵\text{-}۰)$$

$$۰ = -\left(\gamma_{۳۱} - i\delta\right)\rho_{۳۱} + \frac{i\Omega_c}{۲}\rho_{۲۱}. \qquad (۳۶\text{-}۰)$$

برای ساده‌سازی، تعریف می‌کنیم:

$$\Gamma_{۲۱} = \gamma_{۲۱} - i\Delta_p, \qquad \Gamma_{۳۱} = \gamma_{۳۱} - i\delta. \qquad (۳۷\text{-}۰)$$

بنابراین:

$$0 = -\Gamma_{21}\rho_{21} + \frac{i\Omega_p}{2} + \frac{i\Omega_c^*}{2}\rho_{31}, \tag{۳۸-۰}$$

$$0 = -\Gamma_{31}\rho_{31} + \frac{i\Omega_c}{2}\rho_{21}. \tag{۳۹-۰}$$

از معادله‌ی (۳۹-۰) داریم:

$$\rho_{31} = \frac{i\Omega_c}{2\Gamma_{31}}\rho_{21}. \tag{۴۰-۰}$$

با جایگذاری (۴۰-۰) در (۳۸-۰)، پاسخ میدان probe به‌دست می‌آید:

$$\rho_{21} = \frac{\frac{i\Omega_p}{2}\Gamma_{31}}{\Gamma_{21}\Gamma_{31} + \frac{|\Omega_c|^2}{4}}. \tag{۴۱-۰}$$

توضیح فیزیکی: عنصر ρ_{21} پاسخ نوری محیط به میدان probe است. هرچه ρ_{21} کوچک‌تر شود، جذب probe کمتر شده و پنجره‌ی EIT واضح‌تر ظاهر می‌شود.

۹-۱-۰ پذیرفتاری نوری میدان probe

پذیرفتاری نوری یا susceptibility مربوط به میدان probe متناسب با نسبت ρ_{21} به Ω_p است:

$$\chi_p \propto \frac{\rho_{21}}{\Omega_p}. \tag{۴۲-۰}$$

بنابراین:

$$\chi_p \propto \frac{i\Gamma_{31}}{\Gamma_{21}\Gamma_{31} + \frac{|\Omega_c|^2}{4}}. \tag{۴۳-۰}$$

قسمت موهومی χ_p جذب میدان probe را تعیین می‌کند، و قسمت حقیقی آن مربوط به پاشندگی و تغییر فاز میدان عبوری است:

$$\mathrm{Im}(\chi_p) \longrightarrow \text{جذب}, \qquad \mathrm{Re}(\chi_p) \longrightarrow \text{تغییر فاز و پاشندگی}. \tag{۴۴-۰}$$

توضیح فیزیکی: χ_p مشخص می‌کند که محیط اتمی چقدر میدان probe را جذب می‌کند یا فاز آن را تغییر می‌دهد. در EIT، این کمیت در مرکز پنجره‌ی شفافیت بسیار کوچک می‌شود.

۱۰-۱-۰ شرط ایده‌آل برای ظهور EIT

در حالت ایده‌آل، دیتونینگ دو-فوتونی صفر است:

$$\delta = 0. \tag{۴۵-۰}$$

همچنین اگر ناهمدوسی بین حالت پایه و حالت ریدبرگ ناچیز باشد:

$$\gamma_{31} \simeq 0, \tag{۴۶-۰}$$

آنگاه:

$$\Gamma_{۳۱} = \gamma_{۳۱} - i\delta \simeq ۰. \quad (۴۷\text{-}۰)$$

در نتیجه از رابطه‌ی (۴۱-۰) داریم:

$$\rho_{۲۱} \simeq ۰. \quad (۴۸\text{-}۰)$$

بنابراین:

$$\chi_p \simeq ۰. \quad (۴۹\text{-}۰)$$

پس جذب میدان probe تقریباً از بین می‌رود و پنجره‌ی شفافیت ظاهر می‌شود.
توضیح فیزیکی: وقتی شرط تشدید دو-فوتونی برقرار باشد و همدوسی بین حالت پایه و ریدبرگ خراب نشود، اتم وارد حالت تاریک می‌شود. در این حالت مسیر جذب probe از طریق حالت میانی حذف شده و محیط برای probe شفاف می‌شود.

۱۱-۱-۰ حالت تاریک در سامانه‌ی Ladder EIT

در حالت ایده‌آل، حالت تاریک را می‌توان به‌صورت یک برهم‌نهی از حالت پایه و حالت ریدبرگ نوشت:

$$|D\rangle = \frac{\Omega_c |۱\rangle - \Omega_p |۳\rangle}{\sqrt{|\Omega_c|^۲ + |\Omega_p|^۲}}. \quad (۵۰\text{-}۰)$$

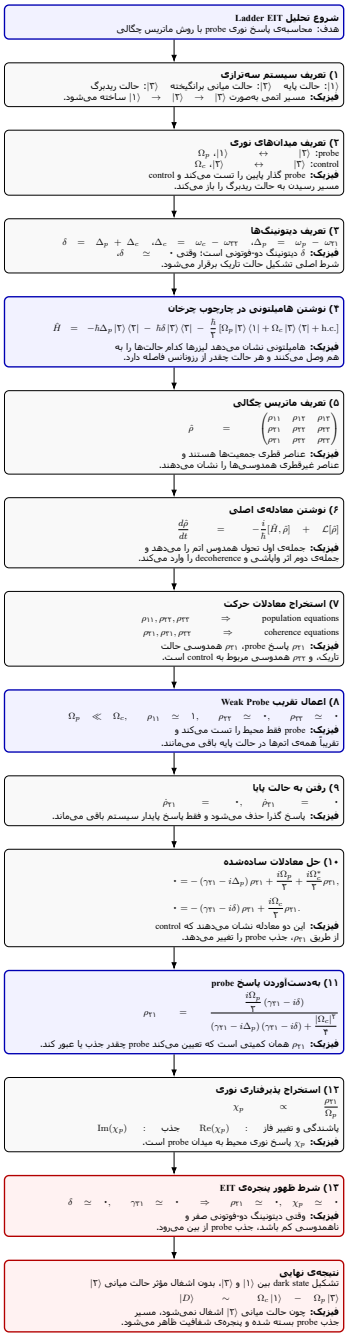
در رژیم $\Omega_p \ll \Omega_c$، این حالت عمدتاً شبیه حالت پایه است، اما مقدار کوچکی از حالت ریدبرگ نیز در آن وجود دارد:

$$|D\rangle \approx |۱\rangle - \frac{\Omega_p}{\Omega_c} |۳\rangle . \quad (۵۱\text{-}۰)$$

توضیح فیزیکی: حالت تاریک ترکیبی از $|۱\rangle$ و $|۳\rangle$ است که سهمی از حالت میانی $|۲\rangle$ ندارد. چون حالت میانی همان حالت جذب‌کننده‌ی نور probe است، حذف آن از حالت تاریک باعث از بین رفتن جذب و ظهور EIT می‌شود.

۱۲-۱-۰ نتیجه‌ی فیزیکی نهایی

در سامانه‌ی Ladder EIT، میدان control باعث ایجاد همدوسی بین حالت پایه و حالت ریدبرگ می‌شود. این همدوسی یک حالت تاریک می‌سازد که در آن حالت میانی اتلافی $|۲\rangle$ اشغال نمی‌شود. به همین دلیل جذب میدان probe سرکوب می‌شود و یک پنجره‌ی شفافیت باریک در طیف عبور ظاهر می‌گردد.
این مکانیسم پایه‌ی اصلی گیرنده‌های اتمی ریدبرگ است؛ زیرا میدان‌های RF یا مایکروویو با تغییر حالت‌های ریدبرگ، طیف EIT را تغییر می‌دهند و این تغییر به‌صورت تغییر در عبور نور probe قابل اندازه‌گیری است.


شروع تحلیل Ladder EIT
هدف: محاسبه‌ی پاسخ نوری probe با روش ماتریس چگالی
۱) تعریف سیستم سه‌ترازی
|۱⟩: حالت پایه |۲⟩: حالت میانی برانگیخته |۳⟩: حالت ریدبرگ
فیزیک: مسیر آتمی به‌صورت |۳⟩ → |۲⟩ → |۱⟩ ساخته می‌شود.
۲) تعریف میدان‌های نوری
|۲⟩ ↔ |۱⟩ :probe Ωp
|۳⟩ ↔ |۲⟩ :control Ωc
فیزیک: probe گذار پایین را تست می‌کند و control مسیر رسیدن به حالت ریدبرگ را باز می‌کند.
۳) تعریف دیتونینگ‌ها
Δp = ωp − ω۲۱ ،Δc = ωc − ω۳۲ ،δ = Δp + Δc
فیزیک: δ دیتونینگ دو-فوتونی است؛ وقتی δ ≃ ۰
شرط اصلی تشکیل حالت تاریک برقرار می‌شود.
۴) نوشتن هامیلتونی در چارچوب چرخان
Ĥ = −ħΔp |۲⟩⟨۲| − ħδ |۳⟩⟨۳| − (ħ/۲)[Ωp |۲⟩⟨۱| + Ωc |۳⟩⟨۲| + h.c.]
فیزیک: هامیلتونی نشان می‌دهد لیزرها کدام حالت‌ها را به هم وصل می‌کنند و هر حالت چقدر از رزونانس فاصله دارد.
۵) تعریف ماتریس چگالی
ρ̂ = (ρ۱۱ ρ۱۲ ρ۱۳ ; ρ۲۱ ρ۲۲ ρ۲۳ ; ρ۳۱ ρ۳۲ ρ۳۳)
فیزیک: عناصر قطری جمعیت‌ها هستند و عناصر غیرقطری همدوسی‌ها را نشان می‌دهند.
۶) نوشتن معادله‌ی اصلی
dρ̂/dt = −(i/ħ)[Ĥ, ρ̂] + ℒ[ρ̂]
فیزیک: جمله‌ی اول تحول همدوس اتم را می‌دهد و جمله‌ی دوم اثر واپاشی و decoherence را وارد می‌کند.
۷) استخراج معادلات حرکت
ρ۱۱, ρ۲۲, ρ۳۳ ⇒ population equations
ρ۲۱, ρ۳۱, ρ۳۲ ⇒ coherence equations
فیزیک: ρ۲۱ پاسخ probe، ρ۳۱ همدوسی حالت تاریک، و ρ۳۲ همدوسی مربوط به control است.
۸) اعمال تقریب Weak Probe
Ωp ≪ Ωc, ρ۱۱ ≃ ۱, ρ۲۲ ≃ ۰, ρ۳۳ ≃ ۰
فیزیک: probe فقط محیط را تست می‌کند و تقریباً همه‌ی اتم‌ها در حالت پایه باقی می‌مانند.
۹) رفتن به حالت پایا
ρ̇۲۱ = ۰, ρ̇۳۱ = ۰
فیزیک: پاسخ گذرا حذف می‌شود و فقط پاسخ پایدار سیستم باقی می‌ماند.
۱۰) حل معادلات ساده‌شده
۰ = −(γ۲۱ − iΔp) ρ۲۱ + (iΩp/۲) + (iΩc*/۲) ρ۳۱ ،
۰ = −(γ۳۱ − iδ) ρ۳۱ + (iΩc/۲) ρ۲۱ .
فیزیک: این دو معادله نشان می‌دهند که control از طریق ρ۳۱، جذب probe را تغییر می‌دهد.
۱۱) به‌دست‌آوردن پاسخ probe
ρ۲۱ = [(iΩp/۲)(γ۳۱ − iδ)] / [(γ۲۱ − iΔp)(γ۳۱ − iδ) + |Ωc|²/۲]
فیزیک: ρ۲۱ همان کمیتی است که تعیین می‌کند probe چقدر جذب یا عبور کند.
۱۲) استخراج پذیرفتاری نوری
χp ∝ ρ۲۱/Ωp
پاشندگی و تغییر فاز : Re(χp) جذب : Im(χp)
فیزیک: χp پاسخ نوری محیط به میدان probe است.
۱۳) شرط ظهور پنجره‌ی EIT
χp ≃ ۰, ρ۲۱ ≃ ۰ ⇒ γ۳۱ ≃ ۰, δ ≃ ۰
فیزیک: وقتی دیتونینگ دو-فوتونی صفر و ناهمدوسی کم باشد، جذب probe از بین می‌رود.
نتیجه‌ی نهایی
تشکیل dark state بین |۱⟩ و |۳⟩، بدون اشغال مؤثر حالت میانی |۲⟩
|D⟩ ∼ Ωc |۱⟩ − Ωp |۳⟩
فیزیک: چون حالت میانی |۲⟩ اشغال نمی‌شود، مسیر جذب probe بسته شده و پنجره‌ی شفافیت ظاهر می‌شود.

۱

شکل ۰-۳: فلوچارت مراحل استخراج پاسخ Ladder EIT با روش ماتریس چگالی. ابتدا سیستم سه‌ترازی و میدان‌های probe و control تعریف می‌شوند، سپس هامیلتونی و معادله‌ی اصلی نوشته می‌شود. با اعمال تقریب weak probe و حالت پایا، پاسخ نوری $\rho_{۲۱}$ و پذیرفتاری χ_p به‌دست می‌آید. شرط $\delta \simeq ۰$ همراه با ناهمدوسی کم باعث تشکیل حالت تاریک و ظهور پنجره‌ی EIT می‌شود.

منابع